第40卷 第5期
2023年5月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 40 No. 5
May 2023

吉兰泰盐湖防护体系建立38 a以来土壤养分特征

魏亚娟[1,2]， 刘美英[3]， 解云虎[1]， 李 星[4]

（1. 包头师范学院资源与环境学院，内蒙古 包头 014030；2. 内蒙古农业大学沙漠治理学院，内蒙古 呼和浩特 010018；3. 内蒙古农业大学草原与资源环境学院，内蒙古自治区土壤质量与养分资源重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010018；4. 中国林业科学研究院沙漠林业实验中心，内蒙古 磴口 015200）

摘 要： 为了科学评价吉兰泰盐湖防护体系对土壤养分积累的影响。以吉兰泰盐湖防护体系不同防护体系类型（流沙固阻带、封沙育草带、防风阻沙带和盐湖防护林带）为研究对象，采用野外取样与室内实验相结合的方法，对其土壤养分积累状况进行对比研究，从而为吉兰泰盐湖防护林的管理提供理论依据。结果表明：（1）土壤有机碳（SOC）、全氮（TN）、全磷（TP）、碱解氮（AN）和速效磷（AP）含量增加量分别介于0.45~1.92 $g\cdot kg^{-1}$、0.03~0.58 $g\cdot kg^{-1}$、0.15~0.43 $g\cdot kg^{-1}$、1.33~13.31 $mg\cdot kg^{-1}$和0.12~12.94 $mg\cdot kg^{-1}$，且土层深度、防护体系类型及其二者的相互作用对土壤SOC、TN、TP和AP含量增加影响显著。（2）盐湖防护体系营建对0~100 cm土层土壤养分有显著正效应，且土层深度、防护体系类型及其二者的相互作用对土壤TP相对相互作用强度（RII_{TP}）、AN相对相互作用强度（RII_{AN}）、AP相对相互作用强度（RII_{AP}）和总相对相互作用强度（$RII_{总}$）影响显著。（3）土壤养分恢复指数表明盐湖防护体系内不同防护体系类型土壤养分均有不同程度提高，流沙固阻带、封沙育草带、防风阻沙带和盐湖防护林带土壤养分恢复指数分别为7.83%、37.72%、185.12%和252.36%。吉兰泰盐湖防护体系经过38 a的营建能有效促进土壤养分累积，有利于吉兰泰盐湖周边生态恢复和重建。

关键词： 植被恢复；养分积累；相对相互作用强度；防护体系类型；盐湖防护体系

营建人工防护林是治理沙漠化最重要的手段。人工防护体系建设在土壤的形成过程中起着至关重要的作用[1]。土壤为植被生长提供了物质基础，同时植被的生长发育对土壤环境也有一定的反馈作用[2]。土壤养分作为反映土壤特征的重要指标，在有机质分解和转化过程中起着主导作用，影响着生态系统的物质循环和能量流动[3]。土壤养分状况主要受气候类型、植被类型、水文和土壤类型的影响存在较大差异[4-6]。因此，只有准确地厘清防护林土壤养分状况及其变化规律，才能实现荒漠区生态恢复和土壤资源可持续利用。

在沙区建造人工防护林，风沙土质量得到了明显改善，并逐渐发展成固定风沙土，充分说明了沙区防护体系中植被-土壤系统的耦合作用，其对沙区荒漠化防治和生态系统恢复与重建具有重要的现实意义[6]。王岩松等[7]对黄土区油松（*Pinus tabulaeformis*）和刺槐（*Robinia pseudoacacia*）人工林土壤养分研究表明，林分类型对土壤有机碳和全氮含量影响显著。于东伟等[8]对沙地樟子松人工林研究表明，沙质草地营建樟子松后，能有效提高土壤氮固定能力。吕倩等[9]对马尾松（*Pinus massoniana*）人工林研究表明，在建植马尾松初期，其土壤pH、有机质含量和全磷含量均有显著增加。顾梦鹤等[10]对库布其沙漠防护林研究表明，柠条（*Caragana korshinskii*）、旱柳（*Salix matsudana*）和旱柳+小美旱杨（*Populus popular's*）对土壤改良效果较好，杨柴（*Hedysarum laeve*）和速生杨（*Populus* spp.）对土壤的改良效果较差。樊华等[11]对黄羊滩沙地防护林研究表明，营建防护林后，其土壤养分有了极大程度的提升，土壤养分平均提升了203.65%。说明营建防护林

收稿日期： 2023-02-06； **修订日期：** 2023-03-22
基金项目： 自治区高等学校碳达峰碳中和研究专项（STZX202213）；国家自然科学基金青年科学基金项目（41901009）；包头师范学院高层次引进人才科研启动基金（01108022/008）；包头师范学院高层次人才引进科研启动基金项目（BTTCRCQD2020-011）；包头师范学院自然科学类一般项目（BSYKJ2021-ZY02）；包头师范学院自然科学类重点项目（BSYKJ2022-ZZ01）
作者简介： 魏亚娟（1994-），女，博士，讲师，主要从事荒漠化防治研究. E-mail: weiyajuan0305@163.com
通讯作者： 解云虎. E-mail: xieyhsd@126.com

后，有效改善了草场沙化的状况。由此可见，防护林的营建有利于土壤养分积累。但是，不同防护林类型对土壤的改良效果存在一定差异。

吉兰泰盐湖防护体系位于吉兰泰盐湖北部，自1983年开始，自北向南构成了东西长约18 km，南北宽约1 km的流沙固阻带、封沙育草带、防风阻沙带和盐湖防护林带"四带一体"的综合立体防护体系[12]。盐湖防护体系构建对抵御外部恶劣的风沙环境，起到一定的生态防护效益。然而，历经38 a的自然演替，现有盐湖防护体系对土壤养分积累的效果如何？基于此，本文以吉兰泰盐湖防护体系为研究区，系统研究不同防护体系类型(流沙固阻带、封沙育草地、防风阻沙带和盐湖防护林带)养分积累特征，以期深入了解人工植被建植对土壤养分的影响，从而为土壤保育提供理论依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

本研究选择位于内蒙古阿拉善左旗吉兰泰盐湖北部的吉兰泰盐湖防护体系为研究区，地理位置为105°47′08″~105°37′38″E，39°46′58″~39°48′95″N，海拔在960~1030 m，属于典型大陆性干旱荒漠气候，降雨量为113.6 mm，降雨主要集中在7—9月，占全年降雨量的91.77%(图1)。年均潜在蒸发量为3006 mm，年均气温为8.6 ℃，年日照时数为3316 h，无霜期为160 d。多年平均风速为3.6 m·s^{-1}，最大风速为24.0 m·s^{-1}。风力多集中在4~5级。年平均大风日数34 d，扬沙日数为82 d，年风沙流频率为112.9次[13]。主风向为西北风。全年以偏西风为主，合成输沙风向为115°，总输沙势为97.26 VU，属于低能环境，但春季风沙活动最频繁[4]。研究区地势平坦，无人为活动干扰。土壤类型为盐碱土、风沙土，地表土壤疏松，土壤发育程度较低，土壤养分贫瘠。土壤pH在8.51~9.08，土壤呈强碱性。

1.2 防护体系基本情况

吉兰泰盐湖防护体系营建于1983年，在防护体系建设初期，采用生物、工程等多项综合防治技术措施，运用适地适树原则、防护林配置采用片状和带状等形式，形成了乔、灌、草有机结合的防护林带配置模式。经过38 a的建设和完善，现已形成以"流沙固阻带-封沙育草带-防风阻沙带-盐湖防护林带"为一体的盐湖防护体系(表1)。

(1) 流沙固阻带：防止盐湖遭受侵袭的第一道防线。吉兰泰盐湖外围分布大片的流动沙垄，沙垄高度介于2~8 m，主要为西北—东南走向。为了有效防止沙丘前移，分别于2007年和2016年在盐湖外围流动沙垄上布设PLA沙障，保存率分别为73.21%和92.30%。

(2) 封沙育草带：在毗邻流动沙垄的半固定沙垄和固定沙垄区域分布有大量白刺(*Nitraria tangutorum*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、沙米(*Agriophyllum squarrosum*)和芦苇(*Phragmites australis*)等天然植被。其中，以丘

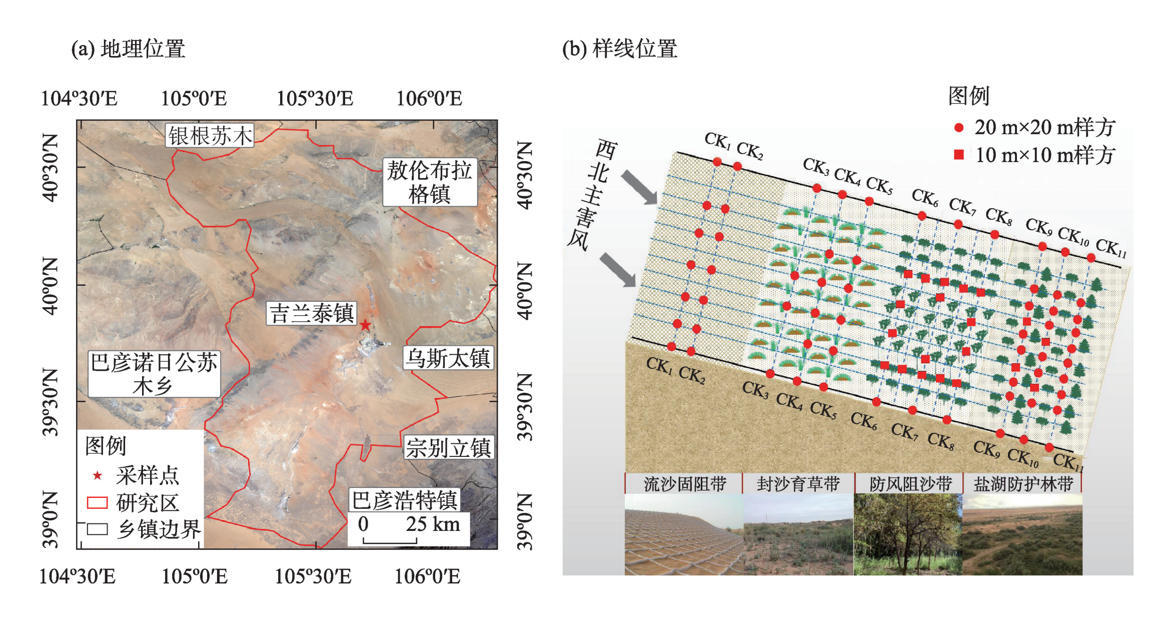


图1 吉兰泰盐湖防护体系地理位置与样线位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of geographical location and sample line location of Jilantai Salt Lake protection system

表1 不同防护体系类型基本情况

Tab. 1 Basic information of different protection system types

防护体系类型	建植方式	恢复年限/a	优势种	灌木			草本		盖度/%	凋落物/($g\cdot m^{-2}$)
				株高/cm	冠幅/m^2	密度/(株·hm^{-2})	株高/cm	密度/(株·m^{-2})		
流沙固阻带	–	–	沙米、白刺	–	–	–	5.65	3.12	<10	0
封沙育草带	自然恢复	–	白刺为主,其他植被有芦苇、苦豆子和披针叶野决明。	30.61	9.68	25.95	48.23	20.00	20	133.25
防风阻沙带	人工植苗	36	沙枣、梭梭、沙拐枣、花棒	295.33	19.82	1666.7	15.20	6.00	58	310.01
盐湖防护林带	人工植苗	36	沙枣、花棒、梭梭、柽柳	259.00	14.48	1111.1	28.00	9.62	45	223.14

注:在防风阻沙带有部分毛白杨和新疆杨长期地下水灌溉,为了避免干扰,不对其土壤进行取样。

间低地分布的白刺灌丛为主体形成了封沙育草带。可以减弱近地表风速,增加地表粗糙度,有效阻滞地表风沙流。

(3) 防风阻沙带:为了提高防风效果,处于封沙育草带后方,至盐湖防护林带的中间过渡地带,人工种植了大量的毛白杨(*Populus tomentosa*),形成以毛白杨为主的田网式防护林带,外围依次为新疆杨(*Phragmites australis*)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)和花棒(*Hedysarum scoparium*)防护林带。

(4) 盐湖防护林带:盐湖防护林网以人工栽植的沙枣、花棒、柽柳(*Tamarix chinensis*)、梭梭和沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)等为主要树种,林内以苦豆子、芦苇为主,兼有禾本科杂草类,丘间低地以栽沙枣为主。其目的是拦截部分悬浮运移的沙尘,同时防止盐湖周边起沙。

1.3 试验设计与方法

试验于2020年8月进行野外试验样地布设,沿西北—东南方向分别布设10条样带,每条样带相隔50 m,样带起始于流沙固阻带,止于盐湖防护林带,以这4种防护体系类型为4个试验处理,同时在每一种防护体系类型两边各布设1条样线作为每一种处理的对照(对比法设计,图1b)。其中,在流沙固阻带布设10个10 m×10 m的样方,在封沙育草带布设10个10 m×10 m的样方,在防风阻沙带布设16个20 m×20 m的样方,在盐湖防护林带布设20个10 m×10 m的样方与4个20 m×20 m的样方。同时,作为对照样地,在各防护体系类型对应的CK样线分别布设2~3个10 m×10 m的样方,共布设82个样方,具体如图1b所示。2020年8月下旬是植被生长的最旺盛期,在植被调查的基础上,采用"S"形取样法对各防护体系类型内0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm和80~100 cm土层进行土壤样品采集。每个样地重复取5组,然后将5个采样点同一土层的土壤均匀混合装入6号塑封袋并进行编号。带回实验室自然风干7 d后,去除动植物残体,按四分法缩减土样过筛,用于土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)、速效氮(AN)和速效磷(AP)的测定,按照《土壤农化分析》常规方法进行测定[14]。

1.4 数据处理

1.4.1 土壤养分积累计算方法 相对相互作用强度指数(Relative Interaction Intense, RII),其表示不同防护体系类型内植被对土壤养分的影响[15-17]。同时,RII取值范围–1~1之间,正值表示盐湖防护体系对该养分含量有提高效应,负值表示植被对该养分含量有降低效应,距离0值越远表示效应越大[18-19]。计算如下:

$$\mathrm{RII}=\frac{(X_n-X_i)}{(X_n+X_i)} \tag{1}$$

式中:X_n和X_i分别表示不同防护体系类型内和相应对照各土层深度的土壤养分值。在本研究中,土壤养分含量包括SOC、TN、TP、AN和AP。

1.4.2 土壤养分恢复状况计算方法 土壤养分恢复指数(Nutrient Recovery Index, NRI),以各防护体系类型土壤为研究对象,计算不同防护体系类型内土壤SOC、TN、TP、AN、AP与对照样地土壤的差异,然后将各防护体系类型内土壤养分的差值进行平均求和,以定量描述植被恢复对土壤养分的影响程度[20]。

$$\mathrm{NRI}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{\left(X_i-X_i'\right)}{X_i}\times 100\% \tag{2}$$

式中:NRI为土壤养分恢复指数;X_i为防护体系类型内土壤第i层土壤养分值;X_i'为对照样地第i层土

壤养分值。

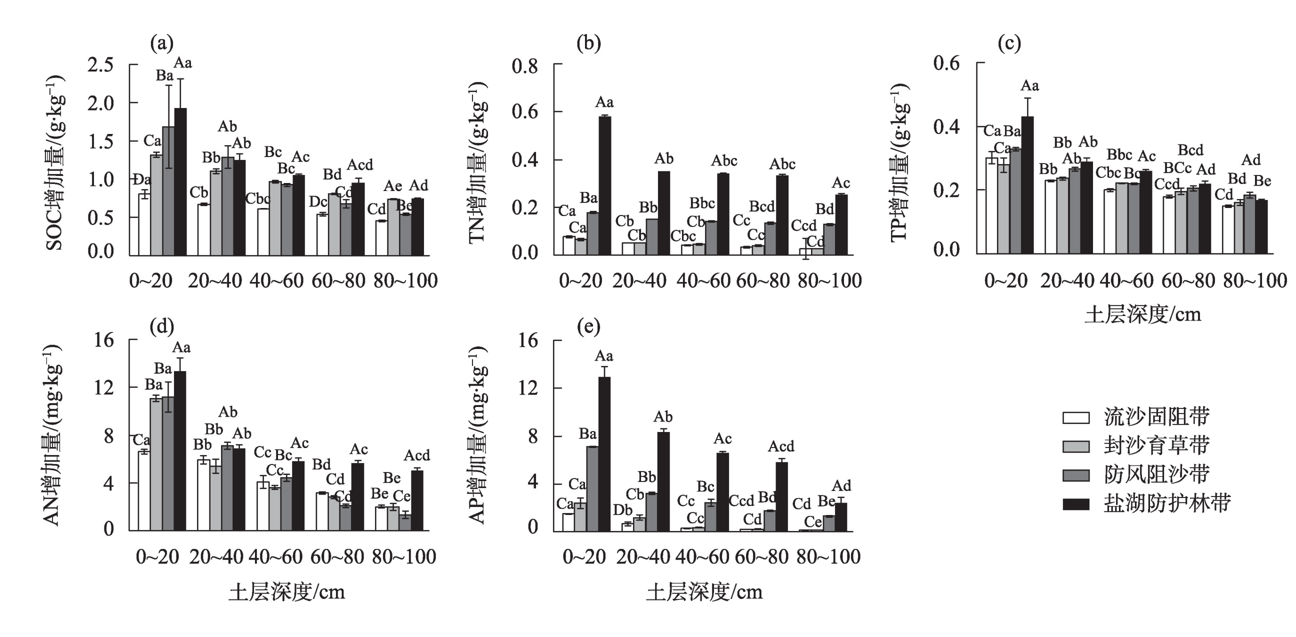
用Excel 2013对实验数据进行前期整理，运用Origin 2021进行绘图，用SPSS 22.00进行单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同防护体系类型土壤养分含量

由图2可知，不同防护体系类型内土壤养分均有不同程度增加，其土壤SOC、TN、TP、AN和AP增加量分别介于0.45~1.92 g·kg^{-1}、0.03~0.58 g·kg^{-1}、0.15~0.43 g·kg^{-1}、1.33~13.31 mg·kg^{-1}和0.12~12.94 mg·kg^{-1}。土壤养分增加量表现为：盐湖防护林带>防风阻沙带>封沙育草带>流沙固阻带，说明吉兰泰盐湖防护体系由外向内土壤养分增加量逐渐增加。盐湖防护林带平均土壤SOC、TN、TP、AN和AP增加量分别是流沙固阻带的0.88倍、7.36倍、0.26倍、0.77倍和18.05倍。各防护体系类型内土壤养分增加量随着土层深度逐渐降低，各防护体系类型0~20 cm土层土壤SOC、TN、TP、AN和AP增加量较80~100 cm土层分别增加77.31%~209.83%、39.16%~180.70%、73.28%~156.30%、166.20%~741.10%和448.19%~1517.01%，说明土壤养分具有明显的表聚作用。

由表2可知，双因素交互分析表明，防护体系类型、土层深度及其二者的相互作用对土壤SOC、TN、TP和AP含量影响显著；而土层深度对土壤AN影响显著，防护体系类型和防护体系类型×土层深度对AN无显著影响。



注：不同大写字母表示同一土层不同防护体系类型土壤养分增加量差异显著(P<0.05)，不同小写字母表示同一防护体系类型不同土层深度土壤养分增加量差异显著(P<0.05)。

图2 不同防护体系类型土壤养分增加量

Fig. 2 Soil nutrient increase in different protection system types

表2 防护体系类型和土层深度对土壤养分增加量的影响

Tab. 2 The effects of protection system types and soil depths on the increase of soil nutrient

因素	指标	SOC	TN	TP	AN	AP
防护体系类型	F	55.01	8.56	10.44	2.21	150.72
	P	0.000***	0.000***	0.000***	0.102	0.000***
土层深度	F	70.18	52.33	136.97	35.73	56.76
	P	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***
防护体系类型×土层深度	F	9.1	3.35	2.94	1.52	7.25
	P	0.000***	0.002**	0.005**	0.160	0.000***

注：*表示0.01≤P≤0.05，**表示P≤0.01，***表示P≤0.001。下同。

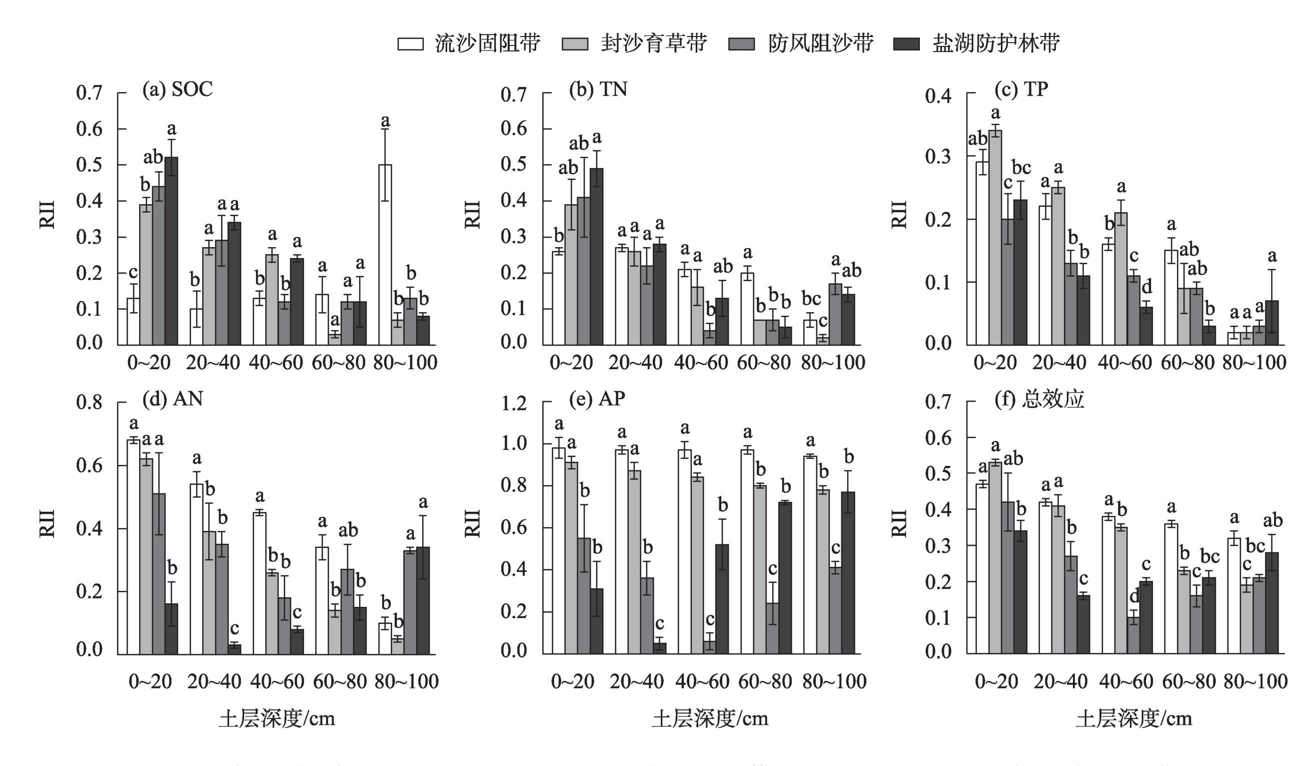
2.2 盐湖防护体系土壤养分积累状况

由图3可知,盐湖防护体系类型对不同土层深度土壤SOC、TN、TP、AN和AP含量有显著正效应,正效应值分别介于0.03~0.52、0.01~0.49、0.01~0.34、0.02~0.68和0.05~0.98。从总效应来看,不同防护体系类型对土壤养分有显著正效应,其正效应值介于0.10~0.53。可见,盐湖防护体系营建有利于土壤养分累积。除盐湖防护林带外,其他防护体系类型土壤养分正效应随土层深度逐渐降低。

由表3可知,双因素交互分析表明,防护体系类型、土层深度及其二者的相互作用对土壤TP相对相互作用强度、AN相对相互作用强度、AP相对相互作用强度和总相对相互作用强度影响显著;土层深度和防护体系类型×土层深度对SOC相对相互作用强度,TN相对相互作用强度影响显著。防护体系类型对SOC相对相互作用强度和TN相对相互作用强度无显著影响。

2.3 不同防护体系类型土壤养分恢复指数变化特征

由表4可知,相较于盐湖防护体系两端对照样地而言,各防护体系类型土壤养分均有不同程度提高。在流沙固阻带,土壤养分恢复指数仅为7.83%,该区域土壤养分频繁的风沙活动不利于土壤养分积累。封沙育草带、防风阻沙带和盐湖防护林带分别是流沙固阻带的4.81倍、23.63倍和32.21倍,可见不同防护体系类型内,以盐湖防护林带对土壤养分



注:RII为相对相互作用强度指数;不同小写字母表示同一土层深度不同防护体系类型土壤养分相对相互作用强度差异显著($P<0.05$)。

图3 不同防护体系类型土壤养分增加量相对相互作用强度

Fig. 3 Relative interaction intense of soil nutrient increase of different protection system types

表3 防护体系类型和土层深度对土壤养分相对相互作用强度的影响

Tab. 3 Effects of protection system type and soil depth on relative interaction intensity of soil nutrients

因素	指标	RII_{SOC}	RII_{TN}	RII_{TP}	RII_{AN}	RII_{AP}	$RII_{总}$
防护体系类型	*F*	1.92	1.51	26.01	28.29	165.13	59.07
	P	0.141	0.228	0.000^{***}	0.000^{***}	0.000^{***}	0.000^{***}
土层深度	*F*	18.15	58.70	107.67	25.00	6.81	56.53
	P	0.000^{***}	0.000^{***}	0.000^{***}	0.000^{***}	0.000^{***}	0.000^{***}
防护体系类型×土层深度	*F*	10.03	5.20	6.62	10.71	13.23	10.03
	P	0.000^{***}	0.000^{***}	0.000^{***}	0.000^{***}	0.000^{***}	0.000^{***}

表4 不同防护体系类型土壤养分恢复指数

Tab. 4 The soil nutrient restoration index of different protection system types /%

防护体系类型	SOC	TN	TP	AN	AP	平均值
流沙固阻带	11.15	12.46	2.89	3.32	9.35	7.83
封沙育草带	89.74	13.86	6.21	11.73	67.05	37.72
防风阻沙带	86.86	275.61	17.07	16.42	529.63	185.12
盐湖防护林带	109.87	800.94	30.34	68.28	1394.42	252.36

的影响程度最大,有利于土壤养分的积累。

3 讨 论

土壤养分是植物生长发育重要的物质来源,其养分增加速率受到林分类型、密度和土壤质地等多种自然因素的影响[21]。在本研究中,土壤SOC、TN、TP、AN和AP含量增加量较小,说明盐湖防护体系经过38 a的营建,土壤养分增加量相对较小,土壤养分依旧贫瘠[22]。这主要是因为研究区土壤为风沙土,其土壤结构松散,持水能力差,不利于养分蓄积。与同一研究区相比,该研究结果显著小于高君亮等[23]和黄雅茹等[24]对乌兰布和沙漠土壤养分的研究结果。这主要与土壤pH有关,盐湖防护体系紧邻吉兰泰盐湖,其土壤pH介于8.51~9.08,属于强碱性土壤,不利于土壤养分累积。研究发现,土壤养分增加量主要受防护体系类型和土层深度的双重影响。土壤养分增加量随着盐湖防护体系由外向内逐渐增加,主要有三方面原因,其一,在盐湖防护体系建立过程中,随着人工植被和自然植被的恢复,其植被盖度和生物量逐渐增加,导致大量的地表枯落物留存于地表,加之植物根系分泌物和地表微生物的积累,改善了土壤结构和土壤持水量,增加了土壤有机物质输入[25]。其二,由于盐湖防护体系的层层阻碍作用,导致风速逐渐降低,地表粗糙度逐渐增加,减少了风蚀,使更多的细粒物质留存于地表,改善了土壤的物理性质,为有机物质积累奠定了基础。其三,植被拦截风沙流和降尘,使更多的细粒物质沉降于地表,进一步增加了地表土壤有机物质含量[23]。研究还发现,土壤SOC、TN、TP、AN和AP含量增加量随土层深度逐渐减小,说明土壤养分具有明显的表聚性。该研究结果与黄雅茹等[24]对乌兰布和沙漠典型灌丛土壤养分研究结果一致。因为表层土壤有机质丰富,土壤结构疏松通气性良好,为微生物活动提供了良好的条件。因此,土壤表层存在丰富的微生物和较高的酶活性,凋落物经微生物分解归还于土壤表层,微生物能将有机物质分解成多种简单且能够被植被直接吸收利用的无机物质[26],因此表层土壤养分富集。

本研究发现,盐湖防护体系的营建对土壤养分有显著正效应,该研究结果与王博等[27]对库布齐荒漠生态系统的研究结果一致。人工植被的营建能有效促进生态系统植被恢复进程。在荒漠生态系统中,营建人工植被加速了研究区植被恢复速度,有效增加了区域内植被覆盖度,进而促进土壤养分累积,使荒漠生态系统逐渐向正向演替。通过双因素分析发现,土层深度对土壤养分正效应影响显著,但防护体系类型对土壤养分含量正效应表现各异。主要原因与土壤养分增加量的结果相同。由于不同防护体系类型下,植被类型、植被覆盖度和群落组成结构不同(表1),显著影响土壤养分含量的积累速率,导致不同防护体系类型土壤相对相互作用强度存在显著差异。研究中还发现,土壤AN和AP相互作用强度高于其他养分。其主要原因是N、P具有功能耦合性,土壤腐殖化、矿质化和土壤微生物的活动随盐湖防护体系植被生长和恢复逐步增强,导致土壤有机质分解,释放出更多有效氮和有效磷[28]。

土壤养分恢复指数是表征植被措施对退化土壤养分的恢复程度的重要指标[29]。通过对不同防护体系类型内土壤养分恢复指数分析发现,土壤养分恢复指数介于7.83%~252.36%,说明工程措施和生物措施能较大程度加速吉兰泰盐湖周边土壤养分恢复进程。而且,土壤养分恢复指数随着防护体系类型由外向内逐渐增加。这主要是因为在流沙固阻带,布设大面积PLA沙障和草方格沙障,其障体能有效增大地表空气动力学粗糙度,降低地表起沙风速,进而有效控制障格内细砂物质被吹蚀;另外,障体能降低过境风沙流携沙能力,促使细砂物质沉降于地表,障格内土壤颗粒细化,为土壤养分

蓄积和植被定居奠定了良好的基础[11]。在封沙育草带,主要为自然恢复的白刺、芦苇和苦豆子。由于自然植被恢复过程较为缓慢,植物通过根系改良土壤结构的作用效果较弱,而且该区域植被生物量和植被盖度较低,导致凋落物输入有限,有机物输入非常匮乏[30]。而在防护阻沙带和盐湖防护林带,植被主要是人工种植的乔木和灌木,其生物量和植被盖度较高,有机物输入较高,增加了土壤养分含量,因此,土壤养分恢复指数由外向内逐渐增大[24]。

4 结 论

(1) 由于盐湖防护体系土壤呈强碱性,导致土壤养分增加缓慢。防护体系类型土壤养分增加量差异显著。其中,盐湖防护林带土壤养分增加量最高。防护体系类型、土层深度是影响土壤养分空间分布的重要性指标。

(2) 盐湖防护体系对土壤养分积累有积极作用。盐湖防护体系营建对0～100 cm土层深度土壤养分有显著正效应。且防护体系类型、土层深度及其二者的相互作用对土壤TP相对相互作用强度(RII_{TP})、AN相对相互作用强度(RII_{AN})、AP相对相互作用强度(RII_{AP})和总相对相互作用强度($RII_{总}$)有显著影响。

(3) 盐湖防护体系营建提高了土壤质量。不同防护体系类型土壤养分恢复指数分别为7.83%、37.72%、185.12%和252.36%。

参考文献(References):

[1] 李从娟, 雷加强, 高培, 等. 人工防护林作用下风沙土成土过程的研究进展[J]. 土壤学报, 2012, 49(6): 1227-1234. [Li Congjuan, Lei Jiaqiang, Gao Pei, et al. Research progress of soil forming process of the study of soil formation process of aeolian sandy soil under the effect of artificial shelter-belt[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(6): 1227-1234.]

[2] 王涛, 蒙仲举, 党晓宏, 等. 库布齐沙漠典型防护林土壤养分特征[J]. 水土保持学报, 2022, 36(1): 325-331. [Wang Tao, Meng Zhongju, Dang Xiaohong, et al. Soil nutrient characteristics of typical shelterbelt in Hobq Desert [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(1): 325-331.]

[3] Xu M J, Cheng S L, Fang H J, et al. Low-level nitrogen addition promotes net methane uptake in a boreal forest across the Great Xing'an Mountain Region, China[J]. Forest Science, 2014, 60(2): 973-981.

[4] 黄雅茹, 郝玉光, 董礼隆, 等. 乌兰布和沙漠东北缘典型固沙林土壤养分特征研究[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(2): 1-9. [Huang Yaru, Hao Yuguang, Dong Lilong, et al. Comparative study on soil chemical properties of typical sand-fixing forests in Ulanbuh Desert[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(2): 1-9.]

[5] 杨玉婷, 石玉林, 李战刚, 等. 陕北"三北"防护林下草本群落特征及其与林分结构和土壤养分的关系[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6542-6551. [Yang Yuting, Shi Yulin, Li Zhangang, et al. Community characteristics of understory herb layer and its relationships with stand structure and soil nutrient availability in the Three-North shelterbelt of Shaanxi, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6542-6551.]

[6] 侍世玲, 任晓萌, 张晓伟, 等. 库布齐沙漠沙枣防护林土壤养分及化学计量特征[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 469-476. [Shi Shiling, Ren Xiaomeng, Zhang Xiaowei, et al. Soil nutrients and stoichiometric characteristics of the *Elaeagnus angustifolia* shelterbelt in the Hobq Desert[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 469-476.]

[7] 王岩松, 马保明, 高海平, 等. 晋西黄土区油松和刺槐人工林土壤养分及其化学计量比对林分密度的响应[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(8): 81-93. [Wang Yansong, Ma Baoming, Gao Haiping, et al. Response of soil nutrients and their stoichiometric ratios to stand density in *Pinus tabuliformis* and *Robinia pseudoacacia* plantations in the loess region of western Shanxi Province, northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(8): 81-93.]

[8] 于东伟, 雷泽勇, 张岩松, 等. 沙地樟子松人工林的生长对土壤氮变化的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(6): 179-186. [Yu Dongwei, Lei Zeyong, Zhang Yansong, et al. Plantation on soil nitrogen change in sandy land[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(6): 179-186.]

[9] 吕倩, 尹海锋, 何朋俊, 等. 马尾松人工林目标树经营初期对土壤理化性质与植物多样性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(3): 500-507. [Lv Qian, Yin Haifeng, He Pengjun, et al. Effects of early management of *Pinus massoniana* plantation target trees on soil physicochemical properties and plant[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2018, 24(3): 500-507.]

[10] 顾梦鹤, 周立华, 王睿, 等. 防护林对库布其沙漠土壤理化性质的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2017, 53(5): 646-651. [Gu Menghe, Zhou Lihua, Wang Rui, et al. Effects of a shelter forest on soil physical and chemical properties in the Kubuqi Desert [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2017, 53(5): 646-651.]

[11] 樊华, 杨志国, 丛志军, 等. 防护林带和封育对沙化草场土壤理化性质的影响[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(6): 43-46, 64. [Fan Hua, Yang Zhiguo, Cong Zhijun, et al. Effect of enclosure and shelter belt on soil physicochemical properties of desertified

meadow[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5(6): 43–46, 64.]

[12] 管雪薇, 杨采怡, 刘广明, 等. 吉兰泰盐湖防护体系阻沙效应及输沙粒度特征[J]. 中国沙漠, 2022, 42(4): 50–59. [Guan Xuewei, Yang Caiyi, Liu Guangming, et al. Sand blocking effect and grain size characteristics of Jilantai Salt Lake protection system[J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(4): 50–59.]

[13] 丁延龙, 高永, 汪季, 等. 生物基可降解聚乳酸(PLA)沙障对沙丘表层沉积物粒度特征的影响[J]. 中国沙漠, 2018, 38(2): 262–269. [Ding Yanlong, Gao Yong, Wang Ji, et al. Effects of biodegradable Poly Lactic Acid sand barriers on surface sediment grain-size characteristics at sand dunes[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(2): 262–269.]

[14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000. [Bao Shidan. Soil Agrochemical Analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Press, 2000.]

[15] Armas C R, Ordiales, Pugnaire F I. Measuring plant interactions: A new comparative index[J]. Ecology, 2004, 85: 2682–2686.

[16] 罗维成, 赵文智, 任珩, 等. 不同气候区灌丛沙堆形态及土壤养分积累特征[J]. 中国沙漠, 2021, 41(2): 191–199. [Luo Weicheng, Zhao Wenzhi, Ren Heng, et al. Nebkha morphological characteristics and soil nutrition content in three regions with different climates in North China[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(2): 191–199.]

[17] Bruno J E, Stachowicz J J, Bertness M D. Inclusion of facilitation into ecological theory[J]. Trends in Ecology and Evolution, 2003, 18: 119–125.

[18] Goldberg D E, Rajaniemi T, Gurevitch J, et al. Empirical approaches to quantifying interaction intensity: Competition and facilitation along productivity gradients[J]. Ecology, 1999, 80: 1118–1131.

[19] Holzapfel C, Mahall B E. Bidirectional facilitation and interference between shrubs and annuals in the Mojave Desert[J]. Ecology, 1999, 80: 1747–1761.

[20] 董莉丽, 郑粉莉. 黄土丘陵沟壑区土地利用和植被类型对土壤质量的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2010, 46(2): 39–44. [Dong Lili, Zheng Fenli. Effects of land use and vegetation types on soil quality in the loess hilly-gully region of China[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2010, 46(2): 39–44.]

[21] 熊瑛楠, 冯天骄, 王平, 等. 晋西黄土区长期人工林恢复对土壤水分和养分性质的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 228–237, 246. [Xiong Yingnan, Feng Tianjiao, Wang Ping, et al. Effects of long-term artificial forest restoration on soil moisture and nutrient characteristics in the Loess Area of Western Shanxi Province, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 228–237, 246.]

[22] 魏亚娟, 汪季, 党晓宏, 等. 干旱荒漠区人工梭梭林土壤碳氮磷密度与生态化学计量特征[J]. 水土保持学报, 2022, 36(3): 259–266. [Wei Yajuan, Wang Ji, Dang Xiaohong, et al. Soil carbon, nitrogen and phosphorus densities and ecological stoichiometry characteristics of *Haloxylon ammodendron* plantations in arid desert area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(3): 259–266.]

[23] 高君亮, 罗凤敏, 段娜, 等. 绿洲化对土壤养分及化学计量特征的影响[J]. 水土保持研究, 2019, 26(4): 50–55. [Gao Junliang, Luo Fengmin, Duan Na, et al. Soil nutrient and stoichiometry characteristics in process of oasisization in the Ulan Buh Desert Oasis, Inner Mongolia[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(4): 50–55.]

[24] 黄雅茹, 马迎宾, 郝玉光, 等. 乌兰布和沙漠东北缘白刺群落与油蒿群落土壤养分特征分析[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2019, 50(4): 559–565. [Huang Yaru, Ma Yingbin, Hao Yuguang, et al. Soil nutrient characteristics analysis of *Artemisia ordosica* and *Nitraria tangutorum* communities in Ulanbuh desert[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2019, 50(4): 559–565.]

[25] Li Y Y, Shao M A. Change of soil physical properties under long termnatural vegetation restorationin the Loess Plateau of China[J]. Journal of Arid Environments, 2006, 64(1): 77–96.

[26] 黄雅茹, 辛智鸣, 葛根巴图, 等. 乌兰布和沙漠东北缘典型灌木群落多样性与土壤养分相关性研究[J]. 中国农业科技导报, 2018, 20(9): 95–105. [Huang Yaru, Xin Zhiming, Gegenbatu, et al. Correlation of typical shrub community diversity and soil nutrient in Northeast Ulanbuh Desert[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2018, 20(9): 95–105.]

[27] 王博, 段玉玺, 王伟峰, 等. 库布齐东段不同植被恢复阶段荒漠生态系统碳氮储量及分配格局[J]. 生态学报, 2019, 39(7): 2470–2480. [Wang Bo, Duan Yuxi, Wang Weifeng, et al. Carbon and nitrogen storage and distribution patterns of desert ecosystems at different vegetation restoration stages in the eastern Hobq Desert[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7): 2470–2480.]

[28] 于洋, 贾志清, 朱雅娟, 等. 高寒沙地植被恢复区乌柳人工防护林对土壤的影响[J]. 林业科学, 2013, 49(11): 9–15. [Yu Yang, Jia Zhiqing, Zhu Yajuan, et al. Effects of *Salix cheilophila* plantation on the improving of soil properties in vegetation restoration area of high-cold sandy land[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(11): 9–15.]

[29] 程才, 李玉杰, 张远东, 等. 石漠化地区苔藓结皮对土壤养分及生态化学计量特征的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(24): 9234–9244. [Cheng Cai, Li Yujie, Zhang Yuandong, et al. Effects of moss crusts on soil nutrients and ecological stoichiometry characteristics in karst rocky desertification region[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 40(24): 9234–9244.]

[30] Lesschen J, Cammeraat L, Kooijman A, et al. Development of spatial heterogeneity in vegetation and soil properties after land abandonment in a semi-arid ecosystem[J]. Journal of Arid Environments, 2008, 72(11): 2082–2092.

Characteristics of soil nutrient accumulation after 38 years of the Jilantai Salt Lake protection system

WEI Yajuan[1,2], LIU Meiying[3], XIE Yunhu[1], LI Xing[4]

(1. Department of Resource and Environment, Baotou Teachers' College, Baotou 014030, Inner Mongolia, China;
2. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China; 3. Inner Mongolia Key Laboratory of Soil Quality and Nutrient Resource, College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China;
4. Experimental Center for Desert Forestry, CAF, Dengkou 015200, Inner Mongolia, China)

Abstract: This study was established to evaluate the influence of the Jilantai Salt Lake protection system on soil nutrient accumulation. This is a comparative study of soil nutrient accumulation in different protection system types under the salt lake protection system (zones for fixing shifting sand, fencing dunes for grass recovery, preventing wind and stopping sand, and a forest for protecting the salt lake) using the method of representative investigation and laboratory analysis. The goal was to provide a theoretical basis for the management of shelter forest in Jilantai Salt Lake. Our results showed the following: (1) The increases in soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), available nitrogen (AN), and available phosphorus (AP) contents were in the range of 0.45−1.92 $g \cdot kg^{-1}$, 0.03−0.58 $g \cdot kg^{-1}$, 0.15−0.43 $g \cdot kg^{-1}$, 1.33−13.31 $mg \cdot kg^{-1}$, and 0.12−12.94 $mg \cdot kg^{-1}$, respectively. Soil depth, protection system type, and their interaction had significant positive effects on the increase in the soil SOC, TN, TP, and AP contents. (2) Establishment of the salt lake protection system had a significant effect on soil nutrients at a depth of approximately 0−100 cm, and the soil depth, protection system type, and their interaction had a significant impact on soil TP relative interaction intense (RII_{TP}), AN relative interaction intense (RII_{AN}), AP relative interaction intense (RII_{AP}), and total RII. (3) Nutrient restoration index showed that soil nutrients improved to different degrees in different protection system types of the salt lake protection system, and their nutrient restoration indexes of zones for fixing shifting sand, fencing dunes for grass recovery, preventing wind and stopping sand and a forest for protecting the salt lake were 7.83%, 37.72%, 185.12%, and 252.36%, respectively. This study showed that, in the 38 years since its establishment, the salt lake protection system could effectively promote soil nutrient accumulation and accelerate soil nutrient restoration in the salt lake area, benefitting the ecological restoration and reconstruction around Jilantai Salt Lake.

Keywords: vegetation restoration; nutrient accumulation; relative interaction intense; protection system type; salt lake protection system